

**МЕТОДИКА БАГАТОФУНКЦІОНАЛЬНИХ ДОСЛІДЖЕНЬ ВПЛИВУ
ФІЗИЧНИХ І ХІМІЧНИХ ЧИННИКІВ НА КОМПЛЕКС ФІЗИКО-
МЕХАНІЧНИХ ВЛАСТИВОСТЕЙ ТА МЕХАНІЧНУ ВТОМУ
МЕТАЛЕВИХ СИСТЕМ**

А.Г. Медвідь, В.Ю. Остаф, І.Ю. Остаф

**TECHNIQUE OF MULTIFUNCTIONAL INVESTIGATIONS
OF THE PHYSICAL AND CHEMICAL FACTORS INFLUENCE
ON A COMPLEX OF PHYSICO-MECHANICAL PROPERTIES
AND MECHANICAL FATIGUE OF METAL SYSTEMS**

A.G. Medvid', V.Yu. Ostaf, I.Yu. Ostaf

Тернопільський національний педагогічний університет ім. Володимира Гнатюка

Abstract. The experimental plant and technique for complex research of influence of the several physical and chemical factors, which operate simultaneously or in certain sequence, on a number of physical properties of samples as plates with thickness 0,5-2 mm, width of 2-15 mm and length of 8-12 mm or cylinder with diameter of 1-5 mm and length of 8-12 mm. The plant allows to investigate influence of corrosion environments, temperatures, a kind of cyclic loadings and character of cracks on endurance of metals and module Jung's, thermo elastic coefficient, factor of thermo-EMF and electroresistance. Measurement can be spent as during influence of the certain factors on separate samples, and it is more reliable comparative measurements on two identical samples of various influences, or identical conditions on samples of one alloy, but with different initial phase-structural conditions. Influences of crystal-structural factors on a complex of physical-mechanical properties of alloys on an iron - nickel basis are analyzed.

Всі відомі методики і установки для дослідження механічних і фізичних властивостей металевих систем, які використовуються в сучасній фізиці металів та практичному металознавстві, не позбавлені цілого ряду недоліків, зокрема таких як: недостатня кореляція та складність співставлення даних вимірювань механічних і фізичних характеристик одних і тих металевих систем, одержаних на різних зразках за різними методиками; залежність результатів вимірювання механічних характеристик матеріалів від виду зразків та методики вимірювань зі значною складністю врахування масштабного фактора; залежність результатів вимірювання деяки з характеристик від стану тільки поверхні зразків, роль якої при зразках малих розмірів може бути домінуючою, і мала їх інформативність про структуру та властивості внутрішніх шарів масивних деталей; неможливість вимірювання кількох фізичних і механічних характеристик в процесі одночасного впливу кількох фізичних та хімічних факторів на структуру зразків; коректно оцінити вплив різних вихідних фазово-структурних станів або відмінних фізико-хімічних умов випробувань зразків на комплекс їх фізико-механічних властивостей; складність оптимального вибору методів неруйнівної фізичної діагностики кристалоструктурних станів зразків та виробів на основі розрізнених даних вимірювань механічних і фізичних властивостей на різних зразках і за різними методиками. Значної кількості названих недоліків можна уникнути, якщо використати модернізований варіант методики комплексного дослідження впливу катодного наводнення на формозміну та властивості масивних металевих зразків, яка описана нами в роботі [1].

Установка, додатково обладнана призматичним затискачем зразків на їх середині, дозволяє від валу електродвигуна передавати на них через кривошипно-шатунний механізм знакозмінні деформації прогину регульовної величини і частоти. Зразки циліндричної форми з невеликим поперечним переріом можна піддавати в установці деформації кручення на заданий кут за допомогою відповідної важільної цапфи або циклічній знакозмінній деформації такого характеру за допомогою того ж кривошипно-шатунного пристрою, який використовується для циклічної деформації прогину пластинчатих зразків. Для зразків малого поперечного перерізу можна забезпечити нагрівання до заданої температури (порядку 400⁰ С), з певною витримкою при ній, шляхом пропускання електричного струму через притискні контакти, що дозволяє стимулювати дифузійні процеси в зразках і досліджувати вплив низькотемпературних фазово-структурних перетворень на комплекс фізико-механічних властивостей металевих систем.

Таким чином, за допомогою запропонованої установки можна проводити комплексні дослідження впливу кількох фізичних і хімічних факторів, які діють одночасно або в певній послідовності, на ряд фізичних властивостей зразків пластинчастої форми (товщиною 0,5 ÷ 2 мм, шириною 2 ÷ 15 мм, довжиною 8 ÷ 12 мм), або циліндричної (діаметром 1 ÷ 5 мм, довжиною 8 ÷ 12 мм). Вимірювання можна проводити як в процесі впливу певних факторів на окремі зразки, так і більш надійно порівняльні вимірювання на двох однакових зразках різних впливів, або однакових умов на зразки одного сплаву, але з різними вихідними фахово-структурними станами. Зокрема, розроблена установка і методика дозволяють досліджувати:

1. Вплив катодного наводнення та інших корозійних середовищ на модуль Юнга і його низькотемпературний термічний коефіцієнт ($e_T = dE/(E \cdot dT)$), виміряні статичним методом прогину зразків і динамічним методом за частотою власних коливань, коефіцієнт термо-ЕРС і питомий електричний опір. За межами установки можна на масивних зразках вимірювати густину методом електролітичного зважування, магнітну індукцію насичення, мікротвердість та твердість зразків за методикою, яка описана нами в праці [2], в кристалоструктурних станах металевих систем, які виникають після відповідних фізичних і хімічних впливів.
2. Вплив механічних напруг (пружних деформацій прогину, кручення, розтягу) на процеси катодного наводнення та взаємодію зразків з агресивними середовищами і відображення дії таких комплексних факторів на фазово-структурних станах зразків та відповідному рівні перерахованих вище характеристик.
3. Вплив корозійних середовищ, температури, виду циклічних навантажень і характеру тріщин на втомну міцність металів.
4. Анізотропію сплавів і вплив текстури на властивості полікристалічного стану металевих систем. Для цього можна використати методику виготовлення монокристалічних зразків, запроповану авторами [3] В основу цієї методики вирощування і гомогенізації великих монокристалів зі сплавів на основі заліза і нікелю [3] покладено використання поліморфних $\alpha \leftrightarrow \gamma$ – перетворень. Стимулювати посилення текстурованості зразків можна їх пластичною деформацією розтягом і високотемпературними відпалами.

Серед відомих сплавів, які знайшли широке практичне використання, найбільш різноманітними комплексами фізичних, механічних і технологічних властивостей характеризуються сплави на Fe-Ni – основі. Не зупиняючись на відомих інварних і елінварних властивостях сплавів на цій основі, слід відзначити унікальні співвідношення фізико-механічних і технологічних властивостей мартенситно-старіючих сталей з концентрацією 25 – 27 % Ni. Леговані в кількості 1÷3 % Ti та Al сплави зазнають старіння як в мартенситному, так і в аустенітному станах і мають мартенситну точку близьку до кімнатної температури, або нижчу за неї. Такі сплави можуть перебувати при кімнатній температурі в чисто мартенситному, чисто аустенітному або змішаному аустенітно – мартенситному з різним співвідношенням

мартенситу і аустеніту залишкового та реверсивного, отриманого частковим $\alpha \rightarrow \gamma$ – перетворенням, станах. Завдяки різноманітності фазових і структурних станів таких сплавів, їх фізичні, механічні, хімічні і технологічні властивості можуть змінюватись в надзвичайно широких межах. Певні комплекси таких властивостей можуть мати значну практичну цінність. Тому пошуки коректних зв'язків між фазово-структурними станами та комплексами фізико-механічних властивостей таких сплавів залишаються нетривіальною задачею фізики металів та практичного металознавства, в розв'язанні якої важлива роль належить комплексним дослідженням фізичних і механічних властивостей таких систем на масивних зразках [4, 5]. Розвитку такої методики комплексного дослідження і присвячена запропонована нами установка.

Дослідження сплавів системи Fe-Ni-Al-Ti [4,5] показали, що найбільш високий рівень механічних властивостей і цікаву технологічність проявляють сплави типу H26ЮТ2Б. Зокрема сплав, що містив 26,4 мас. % Ni, 2,1 % Ti, 1% Al, 0,16% Nb, 0,02 % C, 0,024 % Si, 0,002 % P, 0,001 S, характеризується наступними комплексами механічних і фізичних властивостей. В стані з мінімальною пластичністю (крихкого руйнування) сплав перебуває після гартування від температури 1373 К у воді кімнатної температури з наступним переохолодженням в рідкому азоті і відпуском в інтервалі температур 742 – 753 К протягом 0,5 год. В цьому стані його характеристики мали такі значення: відносне звуження $\psi = 4\%$, відносне видовження $\delta = 3\%$, границя міцності $\sigma_0 = 1815$ МПа, границя пластичності $\sigma_{0,2} = 1668$ МПа, критичний коефіцієнт інтенсивності напруг при вершині тріщини $K_{Ic} = 40,33$ МПа·м^{1/2}, питома поверхнева енергія руйнування $\alpha_n = 100$ КДж·м², кількість циклів до руйнування при знакозмінному навантаженні 450 МПа $N = 7 \cdot 10^4$.

В мартенситно-аустенітному стані з найкращим поєднанням міцності і пластичності, який формується після відпуску при 793 – 798 К, сплав характеризується таким комплексом механічних і фізичних властивостей при кімнатній температурі: твердість $HV = 590$ МПа, границя міцності $\sigma_0 = 1962$ МПа, границя пластичності $\sigma_{0,2} = 1805$ МПа, відносне видовження $\delta = 12\%$, відносне звуження $\psi = 40\%$, критичний коефіцієнт інтенсивності напруг при вершині тріщини $K_{Ic} = 88$ МПа·м^{1/2}, питома поверхнева енергія руйнування $\alpha_n = 800$ КДж·м², кількість циклів до руйнування при знакозмінному навантаженні 450 МПа $N = 10^6$, модуль Юнга $E = 178$ ГПа, коефіцієнт термо-ЕРС в парі з міддю $S = 0,93$ мкВ/К і густина $D = 7,88$ г/см³.

Оптимальному комплексу властивостей сплаву відповідають мінімальне значення коефіцієнта термо-ЕРС (0,93 мкВ/К) і близьке до максимального значення модуля Юнга (178 ГПа), при якому та густині в 7,88 г/см³ швидкість поширення звукових хвиль становить 4753 м/с. Отже, для неруйнівного контролю такого стану деталей з сталей типу H26ЮТ2Б крім магнітометричних методів можна рекомендувати метод термоелектричних вимірювань та вимірювання швидкості поширення звукових або ультразвукових хвиль, які найкраще корелюють між собою.

Отже, сплави залізо-нікель, леговані титаном і алюмінієм, в мартенситно-аустенітному стані, що містить близько 20 % реверсивного аустеніту по об'єму, характеризуються поєднанням високої міцності з достатньо високими пластичністю та пружністю і можуть успішно використовуватися як інструментальні та конструкційні матеріали, які можуть працювати без суттєвих фазово-структурних змін при нагріванні до температур близько 800 К. Зокрема, досліди показали [6], що сплави типу H26ЮТ2Б можуть бути успішно використані для виготовлення пресформ для лиття під тиском алюмінієвих сплавів та гарячого штампування пластмас, сильно навантажених шестерень та інструментів для холодної деформації. Експлуатаційна стійкість названих деталей з такого сплаву перевищує стійкість традиційних стандартних хромо-вольфрамових інструментальних сталей не менше ніж в два рази.

Для сплавів на залізо-нікелевій основі відкритим залишається питання про концентраційні залежності фізичних властивостей і кристалоструктурних станів та роль

в цих залежностях процесів атомного впорядкування. Огляд літератури, в якій дискутуються питання типів впорядкування та фазово-структурних низькотемпературних станів в сплавах системи Fe – Ni, приводиться в праці [7], де шляхом наводнення вдалось отримати додаткові підтвердження на користь точки зору про можливість атомного впорядкування типу Fe_3Ni . Незважаючи на обширні рентгеноструктурні, електронографічні, нейтронографічні дослідження та використання ядерного магнітного резонансу і рентгенівської фотоемісійної спектроскопії, що фіксують структурні неоднорідності, але справжня природа її до цього часу чітко не встановлена. Це можна віднести і до ще менш вивченої області концентрації 15 - 30 % Ni. Комплексне вивчення нами пружних і термопружних властивостей сплавів системи Fe – Ni [8] показало цікаві результати, які дають можливість зробити висновки про причини обширних змін комплексів фізико-механічних властивостей сплавів на цій основі. Зокрема, причинами аномальної поведінки модуля Юнга і низькотемпературного термопружного коефіцієнта залізонікелевих сплавів як в області концентрації нікелю 15-30 %, так і в інварній області (31 – 50 %) найвірогідніше є утворення за певних умов невеликих когерентних з матрицею структурно і магнітно впорядкованих областей, які розміщені на великих відстанях в переважно неупорядкованому твердому розчині. Когерентні напруження на межі таких мікро областей, спонтанна магнітострикція, утворення і розсмоктування областей ближнього атомного впорядкування, структурне і концентраційне розшарування з наявністю “феромагнітних частинок” в “парамагнітній матриці” та навпаки та релаксація по границях зерен – сукупність таких факторів, які можуть чинити на модуль Юнга та термопружний коефіцієнт паралельний або конкуруючий вплив, і є відповідальними за аномальну поведінку цих характеристик в зазначених концентраційних областях. Вказати конкретно, які з названих можливих кристалоструктурних змін є домінуючими за своїм впливом на концентраційні пружні ефекти і яким є детальний механізм цих впливів в даній концентраційній області полікристалічних сплавів важко. Тому можна лише припустити, що саме регулярна заміна атомів Fe в ГЦК- структурі Fe-Ni – сплавів атомами Ni в напрямку [110], якому характерна найбільша анізотропія пружних властивостей, відповідає за аномальні зміни модуля Юнга і НТКЕ в області концентрації Ni 31 – 45 %. Цілком вірогідно, що зміна характеру таких регулярних атомних заміщень відповідає за аномалії концентраційних залежностей пружних властивостей сплавів в інших структурних станах та концентраційних областях. Кристалоструктурний аналіз можливих регулярних замінів атомів заліза атомами нікелю саме в напрямках [110] в ґратці ОЦК (α - стан) дає значення атомних концентрацій Ni в 6,25; 12,5; 18,75; 25; 31,3 %, а в ґратці ГЦК (аустенітному γ – стані) - 25; 37,5; 50; 62,5; 68,75; 75; 81,25; 87,5 %. Саме близько таких концентрацій сплавів проявляються аномалії концентраційних залежностей досліджуваних пружних властивостей, а також інших фізичних та механічних характеристик, у вигляді перегинів, різких змін темпу або екстремумів.

Слід зауважити, що широке практичне застосування знайшли сплави з цікавими комплексами властивостей на основі системи Fe-Ni з концентрацією нікелю близько 5 %, 18 і 25-27 % (мартенситностаріючі сталі), 31, 37, 50 % (інварні та елінварні сплави), 75 % (жаростійкі сплави на нікелевій основі). Не виключена можливість одержання сплавів з важливими комплексами властивостей в інших областях зазначених вище концентрацій, якщо гіпотеза про домінуючу роль напрямленості сил міжатомних зв'язків і анізотропії пружних властивостей знайде переконливе підтвердження. Тому перспективними можуть бути дослідження запропонованим методом на монокристалічних і полікристалічних зразках саме таких концентраційних складів.

Література

1. Медведь А.И., Горбач В.Г., Остаф В.Ю. Взаимосвязь механических напряжений и формоизменения при наводороживании с упругими и электрофизическими свойствами металлических систем // Водородная обработка металлов: Труды Четвертой Международной конференции «ВОМ-2004», Донецк: ДонНТУ, ДонИФЦ ИАУ, 17-21 мая 2004 г. - Донецк, 2004.- С. 210-215.
2. Медвідь А.Г. Комплексний підхід до вибору методів неруйнівного контролю оптимальних станів мартенситностаріючих сталей // Збірник наук. праць.” Фізичні методи та засоби контролю середовищ, матеріалів та виробів“ Львів, Вид-во ФМІ НАН України, Київ-Львів. – 2002. – Вип. 7. – С. 92-97.
3. Сидоров Е. В., Алексеев Н.А. Изготовление монокристаллических отливок из сплавов на основе железа и никеля //Литейное производство. – 1990. - №6. - С. 29-30.
4. Медведь А.И., Горбач В.Г. Физические и механические свойства сплавов Fe-Ni-Al-Ti в мартенситно-аустенитных состояниях //Металлофиз. новейшие технол. – 1997. – 19, №11. – С. 67-72.
5. Медведь А.И. Зависимость комплекса физических и механических свойств сплавов Fe-Ni-Al-Ti от содержания аустенита //Металлофиз. новейшие технол. – 2001. – 23, №2. – С. 205-214.
6. Горбач В.Г., Сидорук И.В., Измайлов В.А. Мартенситно-аустенитные стали как эффективный инструментальный и конструкционный материал //МиТОМ. – 1988. - № 3 – С. 9 – 12.
7. Медведь А.И., Бачинский Ю.Г., Горбач В.Г., Василькив О.В. Влияние обработки водородом на физические свойства железоникелевых сплавов // Металлофиз. новейшие технол. – 2002. – 24, № 6. – С. 857-873.
8. Балицький О.І., Медвідь А.Г., Остаф В.Ю., Костюк І. Ф., Остаф І.Ю., Вплив водню і температури на термопружний коефіцієнт, модуль Юнга та характер пошкоджень сплавів системи Fe-Ni, Fe-N та зварних з'єднань // Машинознавство – 2005. - № 6. – С. 39 – 44.